

Rediseño y automatización de pruebas de diagnóstico en molienda-flotación de minerales

Pablo Guzmán Valenzuela
pablo.guzmanv@alumnos.usm.cl
Matías Garrido Pedreros
matias.garrido@alumnos.usm.cl
Agustín Garrido Pedreros
agustin.garrido@alumnos.usm.cl
Pablo Ramírez Mancilla
pablo.ramirez@alumnos.usm.cl

RESUMEN: La minería evalúa usar medios de molienda de alta aleación que liberen menos microviruta de hierro a la pulpa, lo cual elevaría hasta en un 4% la recuperación de cobre en flotación, efecto que compensaría su alto costo. Sin embargo, en la prueba que se ofrece para diagnóstico, el aporte de hierro por desgaste de bolas es muy inferior que en planta. Por ello, su validez predictiva es objetable. El presente trabajo describe la construcción de un dispositivo que apunta a compensar esta debilidad y sustituir la prueba actual por una de mayor representatividad. El principio de funcionamiento del primer dispositivo construido demostró efectividad al alcanzar tasas de hasta 40 [mg/min] de aporte de microviruta, valor insuficiente para simular condiciones en grandes molinos. El prototipo fue mejorado gracias a la inclusión de un sistema de sujeción que permitió alcanzar mayor frecuencia de giro y mayor estabilidad mecánica del prototipo.

PALABRAS CLAVE: *Desgaste, bola, microviruta, molienda.*

1 INTRODUCCIÓN Y PRÁCTICA INDUSTRIAL

La industria minero metalúrgica mundial se enfrenta actualmente al desafío de optimizar al máximo sus procesos unitarios claves como lo es por ejemplo la flotación de minerales en materia de recuperación y grado de los concentrados. Estos últimos se ven afectados directamente por los fenómenos de desgaste de los medios de molienda que inhiben la flotación del mineral de interés. Las investigaciones en torno al desempeño de medios de molienda alternativos y su influencia en el rendimiento metalúrgico en flotación han sido desarrolladas en los últimos años en torno al desarrollo del molino Magotteaux [1], molino de laboratorio desarrollado por la empresa de bolas de aceros de alta aleación del mismo nombre, el cual fue diseñado para reproducir las condiciones químicas de la pulpa de la planta en una molienda de laboratorio batch,

y cuyos resultados han mostrado el impacto positivo del uso de medios de molienda y revestimientos que liberen menos hierro hacia la pulpa en el proceso. Lo anterior se traduce en menores niveles de pH, mayores niveles de oxígeno disuelto y la reducción del fierro extraíble generando aumentos de hasta un 4 % en la recuperación de minerales de cobre en el posterior proceso de flotación [2]. A pesar de estos resultados y su larga trayectoria, casi 10 años de exposición y difusión de esta alternativa tecnológica, la empresa australiana Magotteaux no ha logrado posicionar sus productos al mercado del beneficio de minerales, considerando que la construcción de plantas piloto para evaluar estas mejoras son de alto costo. El desgaste de medios de molienda de aceros de alta aleación en comparación a medios de molienda clásica se ha estudiado principalmente desde el punto de vista químico (corrosión) sin considerar su importancia relativa frente a otros fenómenos de desgaste mecánico que se dan a nivel industrial [3]. Estudios realizados en el año 1985 de los diferentes mecanismos de desgaste de los medios de molienda, mostró que a nivel de planta, la influencia de las propiedades mecánicas de las bolas era mucho mayor que la composición química [3]. Existe entonces el desafío de generar pruebas de laboratorio que consideren esta variable y así otorguen la confiabilidad necesaria para extrapolar los resultados de laboratorio a planta.

El objetivo del presente proyecto ha sido construir un dispositivo de desgaste controlado de bolas de molienda que compense el aporte de hierro a la pulpa en un molino de laboratorio permitiendo generar en él condiciones fisicoquímicas similares a las que se presentan a nivel industrial. Lo anterior permitirá su uso en un futuro próximo en un estudio más confiable del impacto del uso de medios de molienda de aceros de alta aleación en la recuperación en flotación. El desarrollo del presente trabajo implicó proponer y priorizar alternativas de diseño para aumentar el aporte de micro viruta a la pulpa, diseñar el prototipo, selección de materiales, construcción de un prototipo y la evaluación experimental de su desempeño mediante ensayos de pérdida de masa.

2 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2.1 DISPOSITIVO DE DESGASTE. VERSIÓN INICIAL

La versión inicial del sistema de desgaste diseñado está constituido por tres partes principales el conjunto del motor y su conexión, el conjunto interno de desgaste y la plataforma contenedora como lo muestra la Figura 1:

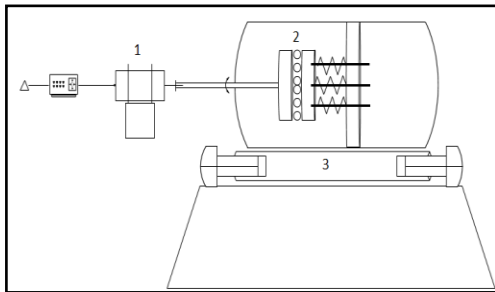


Figura 1: Montaje sistema completo de desgaste

La sección 1 de la Figura 1 corresponde al conjunto del motor que se compone de un motor trifásico montado en una superficie de madera y conectado a un variador de frecuencia mediante el cual se regula las revoluciones toda esta conexión está alimentada por una red trifásica de 380 volt.



Figura 1: Variador de frecuencia



Figura 1: Motor WEG 1HP

La sección 2 es el sistema central de desgaste compuesto principalmente por dos piezas circulares de

concreto polimérico moldeadas con una canaleta que funciona como guía para el movimiento de las 10 bolas de molino de 1 pulgada de diámetro. Una de estas piezas está sujeta mediante guías (que también llevan unos resortes ambas de acero inoxidable) y pernos a una plataforma fija al contenedor y la otra parte está sujeta mediante un postizo a un eje de un motor lo cual hace esta parte es móvil. Todo este sistema se encuentra dentro de un contenedor de la sección 3.



Figura 2: Sistema principal de desgaste

En la sección 3 se encuentra el contenedor tubular montado sobre rodillos que a su vez están sujetos a una estructura de acero.



Figura 3: Plataforma interior fija



Figura 4: Soporte estructural de acero con rodillos

2.2 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En la experiencia, el contenedor fue orientado en forma vertical y llenado hasta completar alrededor de 2/5 de su volumen con una pulpa compuesta de 65% sólido de mineral de cobre de esta forma parte del sistema de desgaste quedó sumergido en la pulpa y permite que al girar pueda existir interacción entre las bolas y el mineral



Figura 5: Metodología de llenado y montaje del contenedor

Ingresado el mineral se dispusieron las bolas en la parte fija del sistema con lo que se montó la parte móvil, luego se cierra el contenedor con una tapa metálica con un orificio del cual sale el eje de la parte móvil. Luego de asegurar la tapa el contenedor con pernos de sujeción este fue acostado sobre los rodillos procediendo al ensamble del eje del sistema con el eje del motor mediante un adaptador con chaveta. Con esto se tiene el conjunto completo del equipo generador de viruta.



Figura 6: Esquema general sistema de desgaste

Las pruebas se realizaron a tiempos de entre 2 a 19 minutos y frecuencias entre los 2 y los 8 [Hz] con y sin pulpa para poder determinar cuál es factor determinante en la abrasión de las bolas si el contacto metal pulpa o el contacto metal concreto.

3 RESULTADOS

3.1 REFERENCIAS DE CÁLCULO Y COMPARACIÓN

Previo a presentar y analizar los resultados, deben especificarse la metodología de estimación y cálculo de las referencias a nivel industrial versus laboratorio. La

estimación utilizada reflejada en el grafico 1 de la tasa de desgaste de medios de molienda a nivel industrial en función de la altura del molino ha sido generada a partir de referencias bibliográficas y otros estudios:

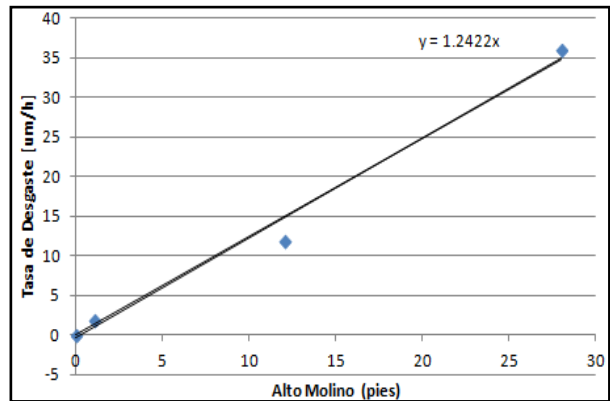


Figura 8: Tasa de desgaste diametral en función de la altura (diámetro) de molinos de bolas estándar.

El modelo de desgaste utilizado relaciona la tasa de pérdida de masa con la tasa de desgaste a través de las Ecuaciones 1 y 2:

$$\frac{dm}{dt} = -4\pi\rho * \left(\frac{3m}{4\pi\rho}\right) * \frac{dr}{dt} \quad (1)$$

$$\Delta m = \left(m_0^{\frac{1}{3}} + \left(\frac{4}{3}\pi\rho\right)^{\frac{1}{3}} \frac{dr}{dt} t\right)^3 - m_0 \quad (2)$$

Donde, "m0" corresponde a la masa inicial de la bola, "m" corresponde a la masa de una bola de molienda en el tiempo t, ρ es la densidad del acero (7850 [kg/m3]) y "dr/dt" corresponde a la tasa de desgaste en [um/h].

Considerando un porcentaje de sólidos de un 65 % para la pulpa, una densidad de 2.7 [ton/m3] para el mineral, un nivel de llenado tanto a nivel industrial como de laboratorio de un 30 % y una porosidad del lecho de bolas de un 40 %, y sabiendo que la densidad de la pulpa está dada por:

$$\rho_{pulpa} = \frac{1}{\frac{\%sólidos}{\rho_{min}} + \frac{1 - \%sólidos}{\rho_{agua}}} \quad (3)$$

Además, considerando que el tiempo de residencia de la pulpa en un molino industrial está expresado por la ecuación 4:

$$t_{residencia} = \frac{\text{Volumen Pulpa}}{\text{Flujo Volumétrico Alimentación}} \quad (4)$$

Es posible comparar tanto la tasa de desgaste por tonelada de mineral tratado y la concentración de hierro final en la pulpa del proceso industrial con su respectivo ensayo equivalente en laboratorio y así estimar la cantidad de viruta que debe adicionarse externamente para compensar el escalamiento.

Tabla 1: Comparación tasa de desgaste a nivel industrial y a nivel laboratorio. Datos basados en bibliografías y experiencias realizadas en el laboratorio de molienda de DIMM UTFSM.

Molino Industrial					
Alto [pie]	Largo [pie]	[ton/h]	Desgaste [g/ton]	[Fe] [g/m3]	
17	32	1500	367	621	
12	24	700	207	351	
12	24	500	290	492	
8	16	300	114	194	
8	16	200	114	194	

Molino de Laboratorio (1 pie x 1 pie)					
Desgaste [g/ton]	[Fe] [g/m3]	tiempo exp [min]	Masa a agregar [g]	Tasa [mg/min]	
1	30	354	9	0,7	78
1	17	236	6	0,3	50
2	30	354	8	0,36	45
4	13	157	4	0,011	3
4	13	153	6	0,017	3

3.2 RESULTADOS PRUEBAS EN LABORATORIO

Las pruebas de producción de microviruta de hierro realizadas arrojaron los siguientes resultados:

Tabla 2: Resultados experimentales de pérdida de masa y tasa de generación de viruta

Estado	Tiempo (min)	Frecuencia (rpm)	Pérdida masa [g]	Tasa Desgaste [mg/min]
Sin Pulpa	15	120	0.2	13
Sin Pulpa	6	480	>0.1	-----
Con Pulpa	15	120	0.3	20
Con Pulpa	18	360	0.4	22
Con Pulpa	2.5	480	0.1	40
Con Pulpa	6	480	0.2	33
Con Pulpa	15	480	0.6	40

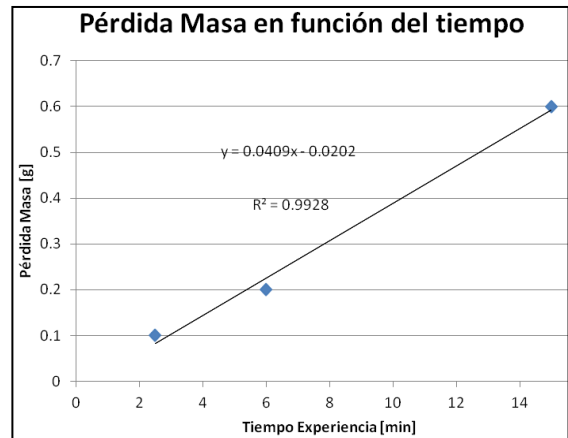


Figura 9 Cinética de desgaste para el dispositivo a 480 RPM

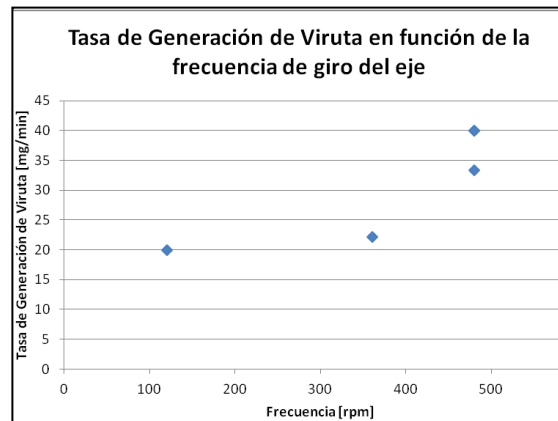


Figura 10 Tasa de generación de virutas para distintas frecuencias de giro del dispositivo



Figura 11 Comparación estado superficial de las bolas antes y después del experimento, a la izquierda bola desgastada, a la derecha bola en estado original



Figura 12 Resultados desgaste abrasivo de bolas en dispositivo



Figura 13 Vista interna del dispositivo en funcionamiento

4 DISCUSIÓN

La tabla 1 muestra referencias a nivel industrial de desgaste de medios de molienda y capacidades operacionales entre otros factores [4] y [5]. Se aprecia efectivamente una diferencia en la tasa de desgaste en [ton/h] a nivel industrial y a nivel de laboratorio, que se traduce en una diferencia de concentración de hierro en la pulpa tras el proceso. Se aprecia que a mayor altura del molino mayor es la influencia del componente mecánico de desgaste por lo que la masa de microviruta que debe aportar el dispositivo es mayor y viceversa tendiendo a igualarse para molinos de tamaño pequeño (bajo 8 pies de alto). Esta disminución drástica está asociada a los volúmenes de pulpa y los tiempos de residencia que se manejan en un caso u otro. En general en molinos de laboratorio existe la tendencia a trabajar con mayores tiempos de residencia que en la industria para lograr una reducción de tamaño

equivalente con bolas más livianas y alturas de levante menores.

Todos estos resultados nos entregan un margen operacional de entre 2.8 y 77 [mg/min] para la producción de viruta por parte del dispositivo y a partir de estos valores se hace evaluado la efectividad de dispositivo diseñado.

Los resultados de las pruebas experimentales expresados en la tabla 2 muestran un aumento considerable de la tasa de desgaste entre un medio sin pulpa y un medio con pulpa. Este resultado puede atribuirse tanto al efecto abrasivo del mineral como al efecto lubricante del fluido que, además de remover la microviruta ya generada, facilita el giro de las bolas dentro del sistema.

También es posible apreciar en el gráfico 3 que la intensidad de la acción abrasiva asociada a la frecuencia de giro del motor es proporcional a la Tasa de Generación de viruta en [mg/min] obtenida, lo que permite utilizar la frecuencia de giro como parámetro de control para producir un determinado desgaste en función de los requerimientos de compensación de microviruta que la prueba de laboratorio requiera.

Se aprecia en el gráfico 2, generado a la mayor frecuencia que soportó el dispositivo operando mecánicamente estable, que la cantidad de microviruta generada en función del tiempo sigue una tendencia lineal.

La ilustración 8 muestra una comparación gráfica entre una bola antes y después de ser desgastada por el dispositivo. Se aprecia claramente la remoción de la capa de óxido (aumento del brillo) y las marcas asociadas al desgaste abrasivo

Cabe destacar que la prueba de 6 minutos a 480 RPM, que muestra una menor tasa de desgaste en [mg/min] que la prueba de 15 minutos a 480 RPM fue realizada cronológicamente después. Esta disminución de la capacidad abrasiva del dispositivo puede estar asociada al desgaste propio del concreto polimérico tras las pruebas realizadas tal como lo muestra la ilustración 9

De la ilustración 10 se aprecia que si bien el llenado inicial del dispositivo se realizó con las proporciones adecuadas de agua y mineral para alcanzar un 65 % de sólidos, el hecho de mantener el contenedor estático no evita el natural decantamiento del sólido lo que se traduce como un factor de error de la consistencia de la pulpa que ingresa al sistema abrasivo. Este aspecto debe corregirse en una segunda versión del prototipo de modo de permitir cierto nivel de agitación y/o movimiento del contenedor del dispositivo de modo de mantener la pulpa mezclada constantemente.

A pesar de que el dispositivo diseñado alcanza altas tasas de desgaste de hasta 40 [mg/min] no logra satisfacer los requerimientos operacionales para

compensar la cantidad de microviruta producida en molinos de gran tamaño, lo que indica la necesidad de realizar modificaciones en una segunda versión del prototipo.

5 REDISEÑO FINAL CORRECTIVO

Con el objetivo de solucionar las problemáticas presentadas en el trabajo con el primer dispositivo diseñado, se decidió incorporar al prototipo un sistema de sujeción que facilitara la instalación de las piezas en la cámara de desgaste, diera mayor estabilidad mecánica al giro y evitar el escape de las bolas de ésta. El sistema está compuesto por 2 discos de Aluminio diseñados específicamente para ser ajustados a las piezas principales de la cámara de desgaste (piezas de concreto polimérico). Ver Figura 14 y 15

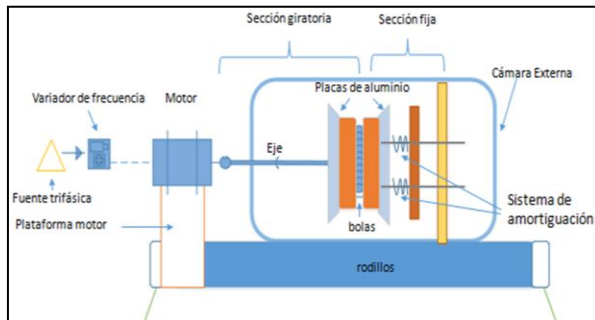


Figura 14 Esquema Montaje dispositivo corregido



Figura 15 Vista Superior e inferior discos aluminio incorporados

El disco superior se encuentra anclado de manera fija a la pieza superior, en cambio, el disco inferior permite el deslizamiento de la pieza inferior accionada por el eje del motor, por lo que no se altera la función básica de la cámara de desgaste. La presión de sujeción se logró mediante la utilización de un sistema de tuerca y contratuerca ajustada a un hilo pasante. Ver figura 16

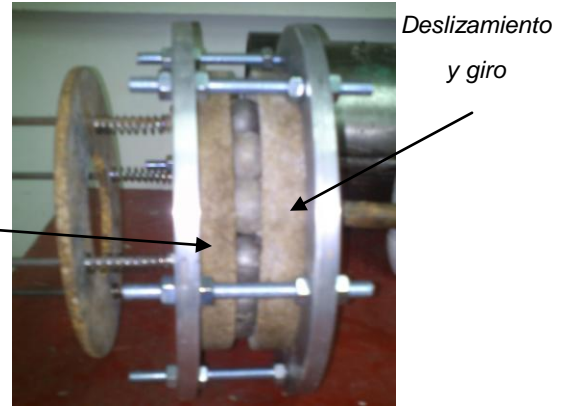


Figura 16 Sistema de Sujeción y estabilidad mecánica

El sistema de sujeción corregido permite al sistema alcanzar frecuencias de giro de hasta 1000 RPM sin escape de las bolas ni colapso del sistema mecánico. Además permite utilizar una plataforma giratoria de base de modo de que la cámara exterior gire en contra sentido respecto al dispositivo de desgaste, provocando que la pulpa pueda agitarse continuamente evitando los problemas de asentamiento del mineral producto de la gravedad. Ver Figura 17.



Figura 17 Dispositivo Corregido en funcionamiento

6 CONCLUSIONES

El principio de funcionamiento diseñado para el dispositivo de compensación de microviruta en ensayos de molienda de laboratorio mostró efectividad al momento de generar material particulado muy fino, bajo un ambiente de pulpa y con la turbulencia suficiente para permitir el arrastre de las partículas metálicas hacia ella.

El dispositivo logró alcanzar niveles de abrasividad de hasta 40 [mg/min] en su primera versión, suficiente para simular a nivel de laboratorio el aporte de microviruta en molinos medianos pero que no es suficiente para representar adecuadamente esta situación para molinos de gran tamaño.

A pesar de este resultado el principio de funcionamiento del dispositivo mostró la versatilidad necesaria para poder ser incluido en él un sistema de control que modifique la frecuencia de giro del dispositivo en función de los requerimientos experimentales de aporte de microviruta para un tiempo determinado de molienda.

La Segunda versión del prototipo incluyó un sistema mecánico más estable que permitió alcanzar frecuencias más altas que las obtenidas en su primera versión. Este resultado permitirá en futuras investigaciones, el desarrollo de un mayor número de pruebas para obtener data más robustas para el desarrollo de modelos matemáticos descriptivos del fenómeno de desgaste en función del tiempo y la frecuencia.

Se presenta el desafío de complementar la evaluación del aporte de microviruta mediante la toma de muestras de hierro extraíble y la evaluación de los niveles de oxígeno disuelto en la pulpa, generando referencias experimentales para futuras pruebas de flotación, sin embargo, esta modificación requeriría el reemplazo de todas las piezas de acero del sistema por otros materiales metálicos y/o poliméricos que no falseen la muestra al aportar microviruta a una tasa más difícil de controlar.

El acoplamiento del dispositivo construido a un sistema de molienda de laboratorio requeriría la inclusión de un sistema de bombeo que permita la circulación de la pulpa mineral entre una cámara de desgaste y una cámara de molienda separadas, a modo de proteger la integridad del dispositivo del impacto de las bolas y también con el objetivo de no alterar el proceso de reducción de tamaño en estudio.

7 REFERENCIAS

- P. Steinier, «Test mill Magotteaux
1] International». Australia Patente US 6695237 B2, 8 Enero 2002.
- Magotteaux Australia, Ian Wark Research
2] Institute, «The Magotteaux Mill: investigating the effect of gridding media on pulp chemistry and flotation performance,» *Sciencedirect*, vol. Mineral Engineering 17, nº 891-896, pp. 1-7, 3 Marzo 2004.
- D. J. Dunn, «Metal removal mechanisms
3] comprising wear in mineral processing,» *Wearing metal conference*, vol. 1, nº 1, pp. 1-8, 1985.
- B. V. .. G. V. W. E. S. a. B. J. Tarrifeño. E,
4] «Análisis del desgaste en el molino semi autógeno de Disputada,» *IV Simposium de molienda*, vol. 1, nº 1, pp. 1-100, 1984.
- J. Y. B., Molienda, Viña del Mar: USM, Beneficio
5] de Minerales 2008.